ÉTUDE DE LA PRÉCISION DU SYSTÈME GPS EN MILIEU FORESTIER

CHRISTIAN PIEDALLU - JEAN-CLAUDE GÉGOUT

Bien que les territoires aient toujours été au cœur des préoccupations du forestier, ceux-ci ont souvent fait l'objet d'une cartographie approximative du fait des difficultés liées aux méthodes de levés topographiques traditionnels. L'arrivée du système GPS (Global Positionning System, système de positionnement global par satellite) a permis l'utilisation d'un outil de terrain *a priori* efficace et facile à utiliser (August, 1994 ; Kruczynski, 1993 ; Sharun, 1993). Leclerc *et al.* (1997) ont ainsi comparé la durée de mise en œuvre de campagnes de localisation au GPS et au théodolite pour le compte de l'Office national des Forêts (ONF) : l'équivalent de 24 jours de travail pour une personne ont été nécessaires pour les levés au théodolite des sites contre 8 heures de travail au GPS. Cette facilité de mise en œuvre a conduit à une généralisation du système GPS dans certains pays, notamment en Amérique du Nord. Ainsi, en 1998, 90 % des entreprises forestières de l'Est du Canada intégraient des systèmes d'information reposant sur le GPS et les Systèmes d'Information géographique (SIG) dans leurs activités (Emeyriat *et al.*, 1998).

Si l'utilisation du GPS commence à être répandue, les tests permettant de préciser le domaine de validité sont peu nombreux. Ils cherchent soit à estimer la faisabilité de son utilisation en milieu forestier (Leclerc *et al.*, 1997 ; Leclerc, 1996 ; Evans *et al.*, 1992 ; Bilodeau *et al.*, 1993 ; Lejeune et Hellemans, 2000), soit à tester différents paramétrages. Les résultats, très variables du fait des différences de méthodologies employées dans les études, montrent que la précision varie de 1 à 15 m en milieu forestier lorsque le signal est corrigé à l'aide d'informations fournies par une antenne de position connue (GPS utilisé en mode différentiel ou DGPS) (Gehue *et al.*, 1993 ; Leclerc *et al.*, 1997 ; Deckert et Bolstad, 1994 ; Bilodeau *et al.*, 1993 ; Wolniewicz, 2001).

L'effet négatif du couvert forestier sur la précision est constaté ; il est, semble-t-il, plus marqué dans le cas de peuplements de résineux que dans celui des peuplements de feuillus (Deckert et Bolstad, 1994). D'autre part, la précision s'améliore significativement lorsqu'on augmente le nombre d'enregistrements permettant de localiser un site (Deckert et Bolstad, 1994), et ce notamment jusqu'à 100 répétitions, ce qui est confirmé par August *et al.* (1994). Toutes les études montrent enfin une forte hétérogénéité des résultats en fonction du matériel utilisé (Wolniewicz, 2001).

Cependant, les tests réalisés, généralement Outre-Atlantique, sont souvent très spécialisés (test d'un ou deux critères) et peu d'entre eux s'intéressent aux milieux forestiers. La multiplicité des méthodologies, du matériel et des sites d'étude, ainsi que le nombre variable de répétitions des mesures réalisées, conduisent à des résultats hétérogènes. D'autre part, les points de référence servant à estimer les écarts de localisation sont souvent mesurés ou calculés de façon différente selon les différents tests, ce qui limite les possibilités de comparaison.

Dans ce contexte, l'objectif de cet article est de quantifier de façon fiable l'effet du couvert végétal pour différents matériels de terrain et à différentes saisons. Nous souhaitons également évaluer l'effet de différents paramétrages des GPS qui peuvent conditionner la précision de localisation, c'est-à-dire l'écart entre la localisation d'un site mesurée au GPS et ses coordonnées réelles. Ces paramétrages concernent : le nombre d'enregistrements utilisés pour calculer la position d'un site, l'intervalle de temps entre deux enregistrements, le filtrage du signal reçu dans les mauvaises configurations satellitales (seuillage du PDOP), et l'effet de la correction différentielle. Pour effectuer ce travail, nous avons étudié trois sites, dont deux forestiers, en réalisant un grand nombre de répétitions des mesures effectuées.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Présentation du système GPS

Le GPS est un système de localisation par satellites mis en place par le Département américain de la défense dans les années 1970. Il permet de déterminer les coordonnées géographiques d'un point situé à n'importe quel endroit à la surface du globe 24 h sur 24. Le système comporte 24 satellites répartis autour de la terre de telle façon que 4 à 8 d'entre eux soient toujours visibles, quelle que soit la position d'un utilisateur (Botton *et al.*, 1998 ; Gosselin *et al.*, 1993 ; Hurn, 1989). Chaque satellite émet un signal, capté sur terre par le récepteur de terrain, qui permet de mesurer très précisément la distance séparant l'émetteur du récepteur grâce à la mesure du temps de parcours. La mesure de la distance par rapport à un satellite donné permet donc de situer le récepteur sur une sphère centrée sur ce satellite. Avec la réception des signaux de quatre satellites (trois pour obtenir le point d'intersection des trois sphères, un quatrième pour la synchronisation du temps), le récepteur mobile est capable de calculer sa position géographique par triangulation avec une précision variant, pour le matériel utilisé par les forestiers, de quelques décimètres à une trentaine de mètres (Gosselin et Bilodeau, 1993).

La qualité de localisation est fonction de différents paramètres (August *et al.*, 1994 ; Botton *et al.*, 1998 ; Hurn, 1989 ; Kruczynski *et al.*, 1993 ; Deckert et Bolstad, 1994) :

— les réfractions du signal liées au passage dans l'ionosphère et dans la troposphère ;

— les décalages d'horloge entre le GPS et le satellite et les erreurs sur les orbites des satellites ;

— les multitrajets, issus de la réflexion sur des obstacles situés à proximité du récepteur (arbres, relief, murs…) (Gehue, 1993) ;

— la configuration satellitale qui peut conduire à de mauvais positionnements (tous les satellites alignés, ou mal répartis dans le ciel…). La qualité de la configuration satellitale est mesurée dans certains GPS par un indice, le PDOP (Position Dilution Of Precision) dont la valeur est d'autant plus faible que la configuration satellitale est favorable. Des valeurs sous le seuil de 6 sont considérées comme favorables ;

— la dégradation volontaire exercée par le Département américain de la défense se traduisant par une imprécision pouvant aller jusqu'à 100 m sur le positionnement en temps réel. Elle a été désactivée le 1er mai 2000, mais elle peut être théoriquement réactivée à tout moment ;

— le type de matériel utilisé (nombre de canaux, qualité de l'horloge, de l'antenne…) ;

— les paramétrages du GPS (seuils, moyennes de points…).

Afin de réduire certaines de ces contraintes, et notamment l'effet du brouillage exercé par les militaires américains, celui des perturbations atmosphériques, et les erreurs liées aux satellites, une technique appelée correction différentielle (ou DGPS) a été mise en œuvre (Hurn, 1993). Elle

nécessite l'utilisation d'une base fixe dont la localisation précise est connue (antenne fixe ou satellite géostationnaire) et qui enregistre sa position au moment des mesures de terrain. La différence de position entre les coordonnées réelles de la base fixe et ses coordonnées mesurées permet de déterminer à tout moment l'erreur de localisation. Cette erreur étant connue, les corrections en X, Y et Z à appliquer aux mesures de terrain peuvent être facilement mises en œuvre. Selon le matériel utilisé, la correction différentielle peut se faire en temps réel (réception des corrections sur le terrain) ou en temps différé (de retour du terrain, après récupération des données de la base). Lorsque la dégradation par les militaires américains était activée, le DGPS permettait d'améliorer la précision de l'ordre d'un facteur 10 (August *et al.*, 1994). Aujourd'hui, alors qu'elle n'est plus activée, l'intérêt de la correction différentielle en milieu forestier reste à préciser.

Les appareils GPS utilisés lors de la mise en œuvre des tests

Quatre appareils ont été utilisés pour réaliser les tests. Leurs références techniques sont les suivantes :

— Trimble GeoExplorer 1 : version 2.20, 1999 (prix d'acquisition indicatif : 4 500 euros) ;
— Trimble GeoExplorer 2 : version 2.20, 1999 (également 4 500 euros environ) ;
— Trimble Pro XR : version 1.10 (environ 11 000 euros) ;
— Garmin : type 12 MAP (prix d'acquisition indicatif : 450 euros).

Les données des appareils Trimble ont été corrigées à l'aide d'une base fixe localisée au Centre de Nancy de l'École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) et dont les données sont disponibles gratuitement sur internet à partir des sites web de l'ENGREF ou de l'INRA.

Sites d'étude et protocole d'acquisition des données

Trois sites d'étude ont été choisis dans trois formations végétales différentes : milieu ouvert, taillis, futaie feuillue, selon les critères suivants : présence d'une borne IGN dans un rayon de moins de 80 mètres, distance à la base fixe inférieure à 50 km et situation plane ou position de crête. Les coordonnées de ces sites, exprimées dans le système de coordonnées "Lambert 1" avec une précision décimétrique, sont les suivantes :

— Milieu ouvert : borne de Laneuvelotte (Meurthe-et-Moselle), de coordonnées X = 890 525.48 ; Y = 1121 123.23 ; Z = 258.73. La borne a directement été utilisée pour les mesures.

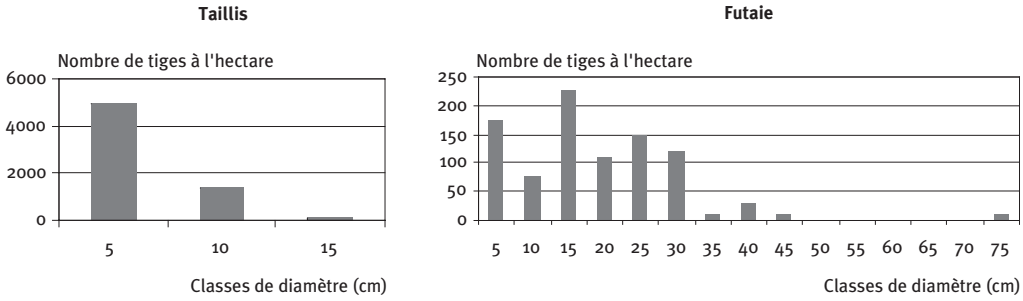
— Taillis : site situé dans le bois de Faulx, commune de Malleloy (Meurthe-et-Moselle), de coordonnées X = 882 065.86 ; Y = 1127 055.87 ; Z = 369.88. La borne IGN étant placée le long d'un chablis, le point de relevé a été localisé au théodolite à 30 mètres de la borne.

— Futaie feuillue : site situé dans le bois de la Grande Goutte, commune de Mazerulles (Meurthe-et-Moselle) de coordonnées : X = 898 444.39 ; Y = 1125 334.51 ; Z = 281.62. Le site a été localisé au théodolite à 60 mètres de la borne IGN, située en lisière de forêt.

Les caractéristiques dendrométriques des peuplements situés sur les sites de taillis et de futaie ont été relevées par un inventaire complet des diamètres sur une surface de 400 m² pour les tiges de diamètre compris entre 2,5 et 17,5 cm et de 1 000 m² pour les tiges de diamètre supérieur. Les densités à l'hectare sont présentées par classes de diamètre dans la figure 1 (p. 432).

Le peuplement de taillis a une surface terrière totale de 22 m²/ha (à partir du diamètre 2,5 cm) et une hauteur totale de 10 à 12 m. Les essences dominantes, fréquentes en milieu calcaire, sont l'Érable champêtre, le Charme, le Chêne, le Hêtre et des feuillus divers.

FIGURE 1 **HISTOGRAMME DES DENSITÉS PAR CLASSES DE DIAMÈTRE DES PEUPLEMENTS DE TAILLIS ET DE FUTAIE**



Le peuplement appelé "futaie feuillue" est un ancien taillis-sous-futaie converti à petits et moyens bois dominants. Sa surface terrière totale, assez importante, est de 35 m²/ha dont 30 m²/ha au-delà de 17,5 cm de diamètre. La hauteur dominante du peuplement est de 26 mètres. Les essences dominantes sont le Chêne sessile, le Charme et le Tilleul.

Mesures réalisées

Six passages, trois en été et trois en hiver, ont été réalisés en 2001 à des dates identiques dans chacun des trois sites afin d'éliminer les biais induits par les constellations satellitales. Ces relevés ont eu lieu pendant une période sèche (sans pluie ni bruine et en conditions de sol sec) et après analyse des configurations satellitales afin de choisir une période durant la journée avec plus de 5 satellites utiles pendant une période d'au moins 6 heures.

Une croix en bois dont chaque axe mesure 3 m est centrée à l'emplacement de chaque borne, et calée par rapport au nord magnétique. Un GPS est placé à chaque extrémité de la croix, à 1 mètre de hauteur sur un pied de théodolite. Ce dispositif vise à reproduire de façon la plus fiable possible les conditions de terrain, tout en évitant les éventuelles interactions entre les différentes machines, et en éloignant les récepteurs de toute pièce métallique. Les coordonnées réelles du site sont recalculées pour tenir compte de ce dispositif.

Les machines sont déclenchées en même temps et la prise de données est réalisée avec un enregistrement par seconde jusqu'à 2 000 points (1 900 pour le Garmin), soit 35 mn dans de bonnes conditions, ou pendant 1 h 30 au maximum avec arrêt temporaire automatique de l'enregistrement pour les valeurs de PDOP supérieures à 50 (appareils de marque Trimble uniquement). Les valeurs de PDOP ainsi que les heures de début et de fin d'acquisition sont également enregistrées pour les appareils de marque Trimble qui disposent de cette fonction.

À l'issue de la phase de terrain, les quatre appareils testés avaient été utilisés au cours de 6 journées différentes (3 pour l'été et 3 pour l'hiver) et chacun dans les 3 types de formations végétales.

Traitement des données et variables testées

La phase de correction différentielle a été réalisée pour chacun des fichiers initiaux issus des appareils Trimble à l'aide du logiciel Pathfinder Office de la marque Trimble. Les fichiers issus du Garmin 12 MAP sont utilisés sans correction différentielle, tel que le GPS le permet en utilisation

courante. Les fichiers ont ensuite été exportés, avec et sans correction différentielle, selon le système de coordonnées Lambert 1 pour la suite des traitements à l'aide du logiciel Pathfinder. Dans chacun de ces fichiers figurent le numéro du fichier GPS, le nom du site, l'heure, le PDOP, et les coordonnées X, Y et Z.

Les tests menés ont été réalisés pour évaluer, d'une part, l'effet de la formation végétale et de la saison avec et sans correction différentielle pour chaque appareil et, d'autre part, l'effet de différents paramétrages de l'appareil (tableau I, p. 434) :

— influence du nombre d'enregistrements sur la précision de localisation : 11 modalités testées ;

— influence de l'intervalle de temps entre deux enregistrements consécutifs lors de la localisation d'un site : 4 modalités testées ;

— influence de la configuration satellitale (en fixant des seuils de PDOP croissants) : 7 modalités testées.

Pour chaque effet testé, nous avons extrait aléatoirement, de chaque fichier de 2 000 points enregistrés sur chaque site, 50 fichiers comparables à des fichiers de terrain standard (tableau I, p. 434). Les caractéristiques de ces 50 fichiers ont été choisies pour permettre la réalisation des tests. Par exemple, pour tester l'influence du nombre d'enregistrements sur la précision de localisation, 11 séries de 50 fichiers ont été extraites de chacun des fichiers de 2 000 points enregistrés sur le terrain. Les caractéristiques de ces fichiers de terrain simulés sont les suivantes : seuil supérieur de PDOP égal à 6, intervalle de capture de 1 point par seconde, 1 seul enregistrement par fichier pour les 50 fichiers de la première série, 3 enregistrements par fichier pour les 50 fichiers de la seconde série..., 300 enregistrements par fichier pour les 50 fichiers de la 11^{e} série. Comme 3 fichiers de 2 000 points ont été pris à trois dates différentes pour une formation végétale, un appareil et une saison donnée, ce sont 150 fichiers qui sont disponibles par série et par combinaison formation/appareil/saison pour réaliser les tests. Cette opération ayant été réalisée pour les 4 appareils, les 3 formations et les 2 saisons testées, ce sont 3 600 fichiers qui ont été extraits par série de l'ensemble des fichiers de terrain soit 39 600 pour les 11 séries testées (tableau I, p. 434).

Pour les autres tests (tableau I, p. 434), nous avons, de la même façon, fait varier successivement les modalités de la variable étudiée et nous avons paramétré les autres variables avec les valeurs standard suivantes (tableau I, p. 434) :

— heure du premier enregistrement du fichier de terrain simulé : sélectionnée de façon aléatoire dans le fichier de 2 000 enregistrements ;

— nombre d'enregistrements consécutifs : 60 ;

— seuil de PDOP (matériel Trimble exclusivement) : 6 ;

— durée entre deux enregistrements : 1 seconde.

Le grand nombre de fichiers traités par modalité (150) a permis de réaliser pour chacune d'entre elles une distribution des erreurs de localisation et de calculer diverses statistiques telles que la moyenne des erreurs, la médiane et le 90^{e} percentile de la distribution (neuf fichiers sur dix ont une erreur de localisation inférieure à celle du 90^{e} percentile de la distribution tandis que un sur dix a une valeur supérieure).

Les différences de précision de localisation liées au matériel, à la saison, à la formation végétale et à la correction différentielle ont été testées à l'aide d'analyses de variance réalisées avec le logiciel SuperANOVA. Le lien entre la précision de localisation et le nombre d'enregistrements pour un site et le seuil de PDOP utilisé a été testé par des régressions réalisées à l'aide du logiciel StatView.

TABLEAU I **Tableau récapitulatif des paramétrages et nombre de fichiers de terrain traités en fonction des différents effets testés**

Effets testés / Paramétrages	Effet de la végétation et de la saison	Absence de correction différentielle	Nombre d'enregistrements	Configuration satellitale seuil › de PDOP	Intervalle de temps
Nombre d'enregistrements par fichier	1 modalité (60 enregistrements)	1 modalité (60)	11 modalités (1, 3, 10, 30, 45, 60, 80, 100, 150, 200, 300)	1 modalité (60)	1 modalité (60)
Seuil supérieur de PDOP	1 modalité (6)	1 modalité (6)	1 modalité (6)	7 modalités (seuils 4, 6, 8, 10, 15, 25, 50)	1 modalité (6)
Intervalle de capture (secondes)	1 modalité (1 seconde)	1 modalité (1)	1 modalité (1)	1 modalité (1)	4 modalités (1, 5, 10, 15 secondes)
Nombre de GPS testés	4 (Gar, Geo 1 et 2, Pro XR)	3 (Geo 1 et 2, Pro XR)	4 (Gar, Geo 1 et 2, Pro XR)	3 (Geo 1 et 2, Pro XR)	4 (Gar, Geo 1 et 2, Pro XR)
Milieux	3 (prairie, taillis et futaie)				
Saisons	2 (été et hiver)				
Nombre total de modalités testées	24	18	264	126	96
Nombre maximum de fichiers traités (150 par modalité)	3600	2700	39600	18900	14400

RÉSULTATS

Effets de la formation végétale et de la saison

• *Taux de capture*

Le taux de capture est le rapport entre le nombre d'enregistrements réellement acquis sur le nombre de points théoriquement captés, défini en fonction du temps de mesure et de l'intervalle de capture. Il varie sensiblement d'une formation à l'autre (tableau II, ci-dessous) : en passant des milieux ouverts à la futaie, le taux de capture passe de 93 à 50 % en moyenne. Il existe une grosse disparité entre les appareils de la marque Trimble dans les milieux fermés : le GeoExplorer 2 capte très mal en futaie (moins de 10 % du temps), alors que le Pro XR capte plus de

TABLEAU II **Taux de capture (en %) des différents GPS dans les trois formations végétales étudiées**

Formation	Garmin	GeoExplorer 1	GeoExplorer 2	Pro XR
Prairie	100	85	90	98
Taillis	96	65	46	67
Futaie	96	40	8	56
Ensemble des formations	97	63	50	74

la moitié du temps dans ce milieu. Le Garmin fonctionne plus régulièrement : il capte les données de façon quasi continue quels que soient les milieux.

L'effet de la saison (été/hiver) sur le taux de capture a été testé une fois tenu compte du couvert et du type d'appareil. Le test ne montre pas d'effet significatif du feuillage sur le taux de capture des différents appareils.

• *Qualité du positionnement*

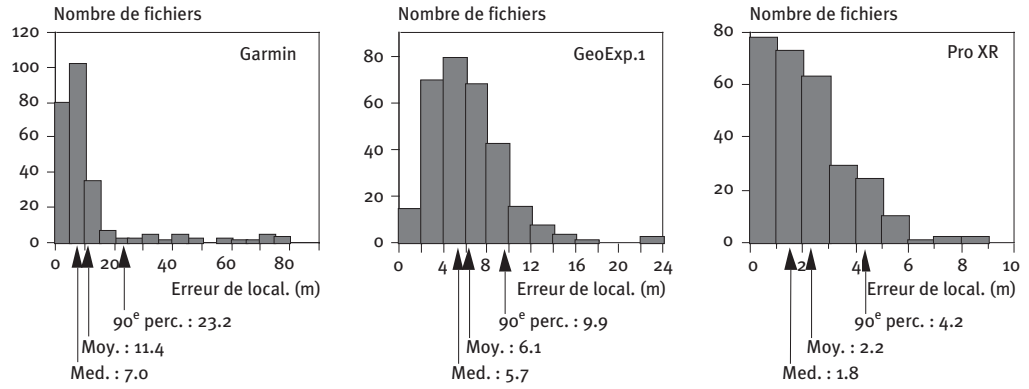
La qualité du positionnement a été mesurée selon les modalités décrites dans le paragraphe "matériels et méthodes" (p. 430). Pour le GeoExplorer 2, le nombre réel de fichiers testés est parfois très inférieur au nombre théorique de 150 par combinaison de facteurs (50 tirages aléatoires dans chaque fichier quotidien et 3 répétitions par saison) du fait du mauvais taux de capture de cet appareil. Le tableau III (ci-dessous) indique le nombre de fichiers réellement utilisés pour effectuer les tests pour chaque combinaison de facteurs.

TABLEAU III **Nombre de fichiers de 60 enregistrements testés pour déterminer la qualité du positionnement et réaliser les tests statistiques associés**

Formation végétale	Saison	Garmin	GeoExplorer 1	GeoExplorer 2	Pro XR	Total
Prairie	Eté	150	150	150	150	600
	Hiver	149	150	150	150	599
Taillis.	Eté	150	139	98	145	532
	Hiver	150	137	106	109	502
Futaie	Eté	149	150	26	132	457
	Hiver	150	150	8	150	458
Total		898	876	538	836	3148

L'observation des distributions des erreurs de localisation sur quelques exemples met en évidence des variations parfois fortes de précision de localisation d'un moment ou d'un jour à l'autre, alors que la position des sites est relevée avec le même matériel, sous le même peuplement et avec les mêmes réglages. Ainsi 2 fichiers de 60 enregistrements pris à des moments différents

FIGURE 2 **DISTRIBUTION DES ERREURS DE LOCALISATION EN FUTAIE pour le Garmin (sans correction différentielle), le GeoExplorer 1 (avec correction différentielle) et le Pro XR (avec correction différentielle)**
Les moyennes, médianes et 90^{e} percentile des distributions sont ajoutés.
Les fichiers extraits en été et en hiver ont été joints



dans les mêmes conditions avec un Garmin sous futaie peuvent avoir des erreurs de localisation qui varient de 0 à 80 m (figure 2, p. 435).

Cette variabilité s'étend de 0 à une vingtaine de mètres pour le GeoExplorer et de 0 à une dizaine de mètres pour le Pro XR. Les distributions des erreurs peuvent être très dissymétriques, ainsi 50 % des fichiers issus du Garmin ont des erreurs de localisation inférieures à 7 m (la valeur de la médiane), tandis que les fichiers de l'autre moitié ont des erreurs qui varient de 7 à 80 m.

L'effet de la saison, estimé à partir de tous les appareils dans toutes les conditions de peuplements, semble nul à très faible, bien qu'il soit significatif d'un point de vue statistique pour les appareils Trimble. La précision de localisation semble améliorée en moyenne de 0,8 m en été, ce qui semble peu cohérent avec la dégradation théorique de la qualité de localisation entraînée par le feuillage. Le Garmin semble *a contrario* plus précis de quelques mètres en hiver qu'en été dans les futaies. Cet effet faible et peu cohérent a conduit à joindre les fichiers d'été aux fichiers d'hiver pour la suite des analyses.

L'effet du peuplement forestier sur la qualité de localisation au GPS est très important. Pour tous les appareils, la qualité du positionnement se dégrade des milieux ouverts aux futaies (tableau IV, ci-dessous). Dans les milieux ouverts, les appareils Trimble atteignent une précision de localisation de l'ordre du mètre ; cette précision moyenne se dégradant très peu pour le Pro XR dans les conditions fermées. Le Garmin a des résultats moins bons que ceux des GeoExplorer mais qui restent cependant très convenables avec une précision moyenne de localisation de l'ordre de 8 m tous couverts confondus. Les deux GeoExplorer ont des résultats comparables. Cette similitude a conduit à ne pas différencier ces deux générations d'appareils dans les analyses ultérieures.

La qualité de localisation d'un site peut varier fortement d'une prise de données sur le terrain à la suivante pour un appareil et un peuplement donné. L'erreur de localisation est en général multipliée par deux pour les appareils Trimble lorsqu'on passe de la médiane au 90^{e} percentile de la distribution, elle est multipliée par trois pour les Garmin. Les médianes varient ainsi de 0,7 à 7 m selon l'appareil et la formation, mais les 10 % des fichiers les plus mal localisés ont des précisions de localisation qui dépassent 2 à 10 m selon la formation végétale pour les appareils Trimble, et 9 à 25 m pour le Garmin.

TABLEAU IV **Moyenne, médiane et 90^{e} percentile (entre parenthèses) des erreurs de localisation des différents GPS dans les différentes formations (en mètres)**
(corrigé = correction différentielle effectuée,
non corrigé = correction différentielle non effectuée ;
*: faible nombre de fichiers).

	Prairie		Taillis		Futaie	
	corrigé	non corrigé	corrigé	non corrigé	corrigé	non corrigé
Garmin	–	4,0 (3,7-8,9)	–	7,2 (4,6-14,6)	–	11,4 (7,0-23,2)
GeoExplorer 1 . . .	1,2 (0,7-2,8)	3,4 (3,2-5,9)	3,4 (2,9-6,2)	4,3 (3,7-7,8)	6,1 (5,7-9,9)	6,6 (6,4-11,2)
GeoExplorer 2 . . .	0,9 (0,8-1,7)	3,1 (2,8-5,1)	3,2 (2,4-6,4)	3,3 (2,7-6,7)	7,2 (4,8-16,2)*	9,7 (5,9-21,9)*
Pro XR.	0,8 (0,6-1,8)	2,5 (2,3-4,6)	1,6 (1,2-3,6)	2,6 (2,4-4,4)	2,2 (1,8-4,2)	3,9 (3,7-6,7)

La correction différentielle améliore sensiblement la précision de localisation dans les milieux ouverts ou avec l'utilisation du Trimble Pro XR. Les milieux ouverts sont ceux pour lesquels l'imprécision de localisation est essentiellement due aux erreurs liées aux satellites et à la traversée

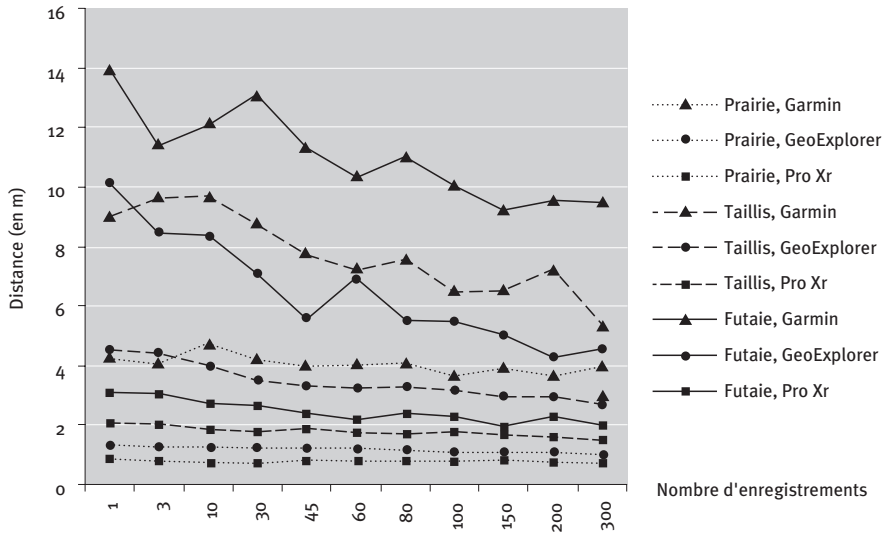
de l'atmosphère par le signal. Dans les milieux forestiers, le multitrajet du signal occasionné par les peuplements forestiers est la source principale des erreurs de localisation. Seul le Pro XR, qui corrige cet effet, voit ses performances s'améliorer sensiblement avec la correction différentielle. Dans ces deux cas, la correction différentielle permet de diviser par 2 ou 3 l'erreur de localisation des sites. Pour les GeoExplorer, la précision de localisation s'améliore peu sous peuplement forestier lorsqu'on utilise des données corrigées car ces appareils ne possèdent pas de fonction de correction du multitrajet et la correction différentielle ne corrige pas ce phénomène local.

EFFETS DES RÉGLAGES DES APPAREILS

Nombre d'enregistrements utilisés pour calculer la position d'un site ponctuel

Le nombre d'enregistrements utilisés pour évaluer la position d'un site a une influence *a priori* forte sur la précision de localisation. Pour étudier ce paramètre, nous n'avons pas tenu compte de l'effet — négligeable — de la saison, nous n'avons pas différencié les résultats pour les GeoExplorer 1 et 2, et les données des appareils Trimble (GeoExplorer et Pro XR) sont traitées par correction différentielle (figure 3, ci-dessous).

FIGURE 3 **VARIATION DE L'ERREUR MOYENNE DE LOCALISATION EN FONCTION DU NOMBRE D'ENREGISTREMENTS UTILISÉS POUR CALCULER LA POSITION D'UN SITE**
(les données du Pro XR et du GeoExplorer sont traitées par correction différentielle)



De façon générale, la précision de localisation varie avec le logarithme du nombre de points pris en compte pour réaliser la mesure. La relation entre ces deux variables, indiquée dans le tableau V (p. 438), est très significative ($R^2 \geq 0{,}8$) pour le GeoExplorer dans toutes les formations végétales et pour le Pro XR sous couvert fermé. En milieu ouvert, l'erreur de localisation mesurée avec le Pro XR varie très peu autour de 80 cm, quel que soit le nombre d'enregistrements pris en compte. Le Garmin suit la loi générale mais avec des écarts plus importants que les appareils de marque Trimble.

TABLEAU V **Paramètres et signification statistique du modèle y = a + b ln (x)**
où y est la précision de localisation en mètres
et x est le nombre d'enregistrements réalisés pour localiser un site
(*: p < 0,1; **: p < 0,01; ***: p < 0,001; NS = non significatif)

Formation	Appareil	Constante (a)	Coefficient (b)	Signification	R^2
Prairie	Garmin	4,4	– 0,09	*	0,34
	GeoExplorer	1,3	– 0,05	***	0,85
	Pro XR	0,8	– 0,00	NS	NS
Taillis.	Garmin	10,1	– 0,66	**	0,71
	GeoExplorer	4,6	– 0,33	***	0,98
	Pro XR	2,1	– 0,09	***	0,84
Futaie	Garmin	13,6	– 0,7	**	0,69
	GeoExplorer	10,1	– 1,0	***	0,93
	Pro XR	3,2	– 0,2	***	0,89

Ces résultats montrent l'intérêt de réaliser un grand nombre d'enregistrements pour localiser un site surtout pour les appareils d'entrée de gamme comme le Garmin. Par rapport à une mesure réalisée avec un seul enregistrement, il est ainsi possible de diminuer l'erreur de localisation de 25 % en futaie avec l'enregistrement de 130, 12 et 55 positions pour respectivement les appareils Garmin, GeoExplorer et Pro XR (le calcul est effectué à partir du modèle présenté dans le tableau V, ci-dessus).

Valeur de PDOP

Les modèles Trimble permettent de cesser l'enregistrement lorsque la constellation satellitale devient défavorable à une localisation précise. Il suffit de paramétrer un seuil de PDOP au-delà duquel la localisation n'est plus calculée. Lors de difficultés de capture de signal, il est cependant possible d'augmenter le seuil de PDOP pour enregistrer sa position, sans que l'on connaisse exactement les conséquences induites sur la précision de localisation. L'objectif de ce test est donc de quantifier l'effet de ces variations sur la précision des données, en simulant 7 seuils de PDOP échelonnés de 4 à 50. Pour ce test, seuls sont concernés les appareils de marque Trimble qui permettent de modifier ce paramétrage en utilisation standard (les données sont corrigées par correction différentielle).

En milieu ouvert, la valeur du PDOP n'influe pas du tout sur la précision de localisation des appareils Trimble GeoExplorer et Pro XR. En milieu fermé (taillis, futaie) par contre, la précision de localisation se dégrade de façon linéaire avec le logarithme de la valeur du PDOP (tableau VI, ci-dessous). Cette dégradation est cependant moindre pour le Pro XR que pour le GeoExplorer.

TABLEAU VI **Paramètres et signification statistique du modèle y = a + b ln (x)**
où y est la précision de localisation en mètres
et x est la valeur seuil de PDOP utilisée pour localiser un site
(*: p < 0,1; **: p < 0,01; ***: p < 0,001; NS = non significatif)

Formation	Appareil	Constante (a)	Coefficient (b)	Signification	R^2
Prairie	GeoExplorer	1,2	0	NS	NS
	Pro XR	0,8	0	NS	NS
Taillis	GeoExplorer	1,4	1,11	***	0,96
	Pro XR	1,0	0,38	***	0,99
Futaie	GeoExplorer	3,0	1,48	**	0,88
	Pro XR	1,7	0,37	*	0,63

Intervalle de temps entre les enregistrements

L'intervalle de capture est paramétrable sur les GPS Trimble, mais il doit rester un multiple de celui utilisé dans la base fixe (5 secondes pour la base ENGREF). Les intervalles de temps entre deux enregistrements de 1, 5, 10 et 15 secondes ont été testés (tableau VII, ci-dessous).

TABLEAU VII **Précision de localisation de la position des sites (en mètres)**
selon le type d'appareil et le type de formation
pour différents intervalles de temps entre les enregistrements
(les données sont corrigées par correction différentielle)

Formation	Appareil	1 seconde	5 secondes	10 secondes	15 secondes
Prairie	GeoExplorer	1,2	1,1	1,1	1,1
	Pro XR	0,8	0,8	0,8	0,8
Taillis	GeoExplorer	3,2	3,0	2,8	2,8
	Pro XR	1,7	1,5	1,4	1,4
Futaie	GeoExplorer	6,9	4,3	4,1	4,3
	Pro XR	2,2	2,0	1,9	1,9

Une amélioration de la localisation est constatée seulement dans les milieux fermés. L'amélioration est assez importante entre 1 et 5 secondes, faible entre 5 et 10 et nulle ensuite. L'amélioration est beaucoup plus sensible pour les GeoExplorer que pour le Pro XR.

DISCUSSION, CONCLUSIONS

La campagne de tests menée dans le cadre de cette étude apporte des enseignements clairs tant sur l'effet des conditions de milieu dans lesquelles sont réalisées les campagnes de mesures que sur les conditions d'utilisation des appareils. Une synthèse des enseignements fournis par ce travail est indiquée dans le tableau VIII (p. 440).

L'effet de la formation végétale est très important à la fois sur le taux de capture et sur la précision. L'erreur de localisation semble proportionnelle à la surface terrière du peuplement mais ne semble pas liée à la présence du feuillage des arbres. Un positionnement précis en forêt, par exemple pour situer une borne ou une limite de propriété avec une précision optimale, nécessitera au moins l'utilisation d'un appareil de type Pro XR avec l'enregistrement d'un grand nombre de points et un seuil de PDOP bas (pour un seuil de PDOP de 6, il faut passer de 30 à 400 enregistrements pour diminuer l'erreur de positionnement de 2,5 m à 2 m en moyenne). Par contre, pour la cartographie d'un sentier de randonnée sur une carte au 1/25 000^{e}, le GeoExplorer ou le Garmin sont des appareils suffisants.

En l'absence de brouillage du signal par les militaires américains, la correction différentielle s'avère utile dans certains milieux et pour certains appareils. Ainsi, en milieu ouvert, on passe de plus de 2 mètres de précision à moins de 1 mètre pour les appareils de marque Trimble. La correction différentielle des mesures du Pro XR permet de diminuer de façon significative l'erreur de localisation en milieu fermé. Par contre, la correction différentielle des données des GeoExplorer en milieu forestier s'avère peu utile.

Les tests réalisés sur l'influence du nombre d'enregistrements pour localiser un site et sur l'intervalle de temps entre deux enregistrements consécutifs fournissent un résultat intéressant : pour un intervalle de temps de 1 à 10 secondes entre 2 enregistrements, la précision ne dépend que de la durée d'enregistrement. Ainsi la précision de localisation est identique pour trois

tableau VIII Tableau récapitulatif des différents effets testés en fonction du matériel utilisé
Les valeurs fournies sont des moyennes exprimées en mètres (P = prairie, T = taillis, F = futaie, * valeurs calculées avec correction différentielle pour les appareils Trimble, et sans pour le Garmin, ** valeurs calculées avec correction différentielle).

Effets	Taux de capture	Précision moyenne	Formation végétale (sans correction différentielle)	Formation végétale (avec correction différentielle)	Nombre d'enregistrements*	PDOP**	Intervalle de temps**
Matériel	Nombre d'enregistrements : 60 Seuil PDOP : 6 Intervalle de temps : 1 point/s				**Nbre eng. : 1** PDOP : 6 Intervalle : 1	Nbre eng. : 60 **PDOP : 25** Intervalle : 1	Nbre eng. : 60 PDOP : 6 **Intervalle : 10**
Garmin	97 %	non corrigé : 7,7	P : 4,0 T : 7,2 F : 11,4	–	P : 4,3 T : 9 F : 13,9	–	–
GeoExplorer	57 %	non corrigé : 4,7 corrigé : 3,5	P : 3,2 T : 3,9 F : 6,9	P : 1,1 T : 3,3 F : 6,2	P : 1,3 T : 4,5 F : 10,1	P : 1,2 T : 5 F : 7,3	P : 1,1 T : 2,8 F : 4,1
Pro XR	74 %	non corrigé : 3,0 corrigé : 1,5	P : 2,5 T : 2,6 F : 3,9	P : 0,8 T : 1,6 F : 2,2	P : 0,8 T : 2,1 F : 3,1	P : 0,8 T : 2,3 F : 3,2	P : 0,8 T : 1,4 F : 1,9
Remarque	Bonne réception du Garmin sous couvert fermé	Efficacité de la correction différentielle surtout pour le Pro XR	Fort effet du couvert végétal sur la précision Précision moyenne du Garmin > 10 m en futaie	Fort effet de la correction différentielle surtout en milieu ouvert et pour le Pro XR	Augmenter le nombre d'enregistrements est surtout efficace en milieu fermé avec le Garmin ou le GeoExplorer. L'amélioration est plus faible lorsque le nombre d'enregistrement est grand	Une diminution du seuil de PDOP est efficace en milieu fermé, plus particulièrement pour le GeoExplorer. La dégradation est plus faible lorsque le seuil de PDOP est élevé	Augmenter l'intervalle de temps est efficace en milieu fermé, dans une gamme de 1 à 10 secondes

fichiers enregistrés pendant 5 minutes dont l'un contiendrait 30 points enregistrés toutes les 10 secondes, l'autre 60 points enregistrés toutes les 5 secondes et le troisième 300 points enregistrés toutes les secondes. Outre la durée d'enregistrement, le seuil de PDOP choisi a une forte influence sur la qualité de localisation : l'erreur de positionnement augmente de 50 à 100 % quand on passe d'un seuil de PDOP de 4 à un seuil de 50. La dégradation est particulièrement marquée pour le GeoExplorer.

Les différents appareils testés couvrent finalement une large gamme de précisions (de 0,5 à environ 20 mètres dans 90 % des cas, selon les milieux et les conditions), et correspondent à des usages différents. Un appareil d'entrée de gamme du type Garmin 12 MAP permet une localisation moyenne à environ 8 mètres près, avec une grande facilité de réception, même sous couvert forestier. Cependant, il peut subir de fortes variations de précision, notamment en forêt (10 % des fichiers enregistrés en futaie présentent de 23 à 80 m d'erreur), d'où la nécessité de

pouvoir stocker sur ce type d'appareil un nombre important d'enregistrements, afin de calculer la position moyenne d'un site avec une meilleure fiabilité. Un récepteur de type GeoExplorer permet après correction différentielle d'espérer une erreur de positionnement inférieure à 4 mètres, malgré une dégradation assez forte de la qualité de mesure en milieu fermé. Le Pro XR permet de descendre en deçà des 2 mètres d'incertitude (données corrigées), avec une dégradation faible en milieu forestier et un relativement bon taux de capture quel que soit le couvert.

Le GPS, tout en étant facile d'utilisation, permet de situer, avec une précision difficile à égaler, les différents objets cartographiques manipulés par le forestier : limites, pistes, points remarquables… L'offre de récepteurs, aujourd'hui très large, permet l'achat d'un matériel adapté à ses besoins, issu du compromis entre la facilité d'acquisition en milieu difficile et la précision de localisation. Les progrès techniques, liés à une baisse des coûts, laissent prévoir une généralisation à moyen terme du GPS pour le positionnement en forêt.

Christian PIEDALLU - Jean-Claude GÉGOUT
Équipe Écosystèmes forestiers et Dynamique des Paysages
Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois
UMR INRA-ENGREF 1092
ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE RURAL, DES EAUX ET DES FORÊTS
14, rue Girardet - CS 4216
F-54042 NANCY CEDEX
(piedallu@engref.fr)
(gegout@engref.fr)

Remerciements
Nous remercions Gérard Lebel de la Direction départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Meurthe-et-Moselle pour son aide lors de la localisation précise des sites utilisés pour les campagnes de test.

BIBLIOGRAPHIE

AUGUST (P.), MICHAUD (J.), LASBASH (C.), SMITH (C.). — GPS for environmental applications : accuracy and precision of locational data. — *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, n° 1, 1994, pp. 41-45.

BILODEAU (J.-M.), GOSSELIN (S.), LOWELL (K.), EDWARDS (G.), GOLD (C.). — Operational integration of GPS into forest management activities which use a GIS monitor forest operation. — GIS'93 symposium, Vancouver, British Columbia, February 1993.

BOTTON (S.), DUQUESNE (F.), EGELS (Y.), EVEN (M.), WILLIS (P.). — GPS, localisation et navigation, CNIG. — Paris : Édition Hermes, 1998.

DECKERT (C.), BOLSTAD (P.V.). — Terrain and canopy influence on Code-Phase GPS position accuracy. — GIS'94 Symposium, Vancouver, British Columbia, 1994.

EMEYRIAT (R.), PICORIT (C.), REULOING (D.). — Cartographie numérique, GPS, radiocommunications : les nouveaux outils de la logistique de l'exploitation forestière. — *Informations-Forêt*, n° 4, fiche n° 579, 1998.

EVANS (D.L.), RONALD (W.C.), SIMMONS (G.T.). — Use of positionning system (GPS) for Forest Plot Location. — *South Journal of Applied Forestry*, vol. 16, n° 2, 1992, pp. 67-70.

GEHUE (H.), MCLINTOCK (D.), CANNON (M.E.). — Georeferencing with GPS : performance analysis in a forested environment. — GIS'93 Symposium, Vancouver, British Columbia, 1993.

GOSSELIN (S.), BILODEAU (J.-M.). — Le Système de positionnement GPS en foresterie : potentiel, limites et applications. — *L'Aubelle*, n° 22, 1993.

HURN (J.). — GPS : a guide to the next utility. — Sunnyvale (California) : Trimble navigation Ltd, 1989. — 76 p.

HURN (J.). — Differential GPS explained. — Sunnyvale (California) : Trimble navigation Ltd, 1993. — 55 p.

KRUCZYNSKI (L.R.), JASUMBACK (A.). — Forestry management applications : forest service experiences with GPS. — *Journal of Forestry*, August 1993, pp. 20-24.

LECLERC (D.). — Utilisation du système GPS en forêt. — ONF, 1996. — 11 p. (rapport interne).

LECLERC (D.), PERROTTE (G.), RIGONDAUD (C.). — Global positionning system, le GPS, mode d'emploi. — *Arborescences*, n° 66, 1997, pp. 2-11.

LEJEUNE (P.), HELLEMANS (P.). — Effet du couvert végétal sur la précision d'un système de positionnement global différentiel (dGPS). — *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, vol. 4, n° 1, 2000, pp. 41-49.

SHARUN (C.). — GPS and GIS : operation use of GPS for cutblock layout under forest canopy. — GIS'93 symposium, Vancouver, British Columbia, 1993.

WOLNIEWICZ (W.). — GPS accuracy test, performance in open area and under forest canopy. — *GIM international*, n° 5, 15, 2001, pp. 56-59.

ÉTUDE DE LA PRÉCISION DU SYSTÈME GPS EN MILIEU FORESTIER (Résumé)

De développement encore récent, le système GPS fait l'objet de nombreuses applications cartographiques forestières mais ses possibilités et limites sont encore mal connues. Le principal objectif de ce travail est d'évaluer l'intérêt du GPS en milieu ouvert et dans différents peuplements forestiers en hiver et en été, à l'aide de plusieurs types d'appareils de marque Trimble et Garmin. L'effet de différents paramétrages des appareils (nombre d'enregistrements pour localiser un site, intervalle de temps entre deux enregistrements, variation de configuration satellitale) sur la qualité des mesures est analysé.

Les campagnes de mesures mettent en évidence un fort effet du matériel et du couvert qui conduisent à des précisions moyennes de localisation qui varient de 0,8 à 11 mètres. Le nombre d'enregistrements utilisés pour localiser un site, l'intervalle de temps entre ces enregistrements, la correction différentielle des données et la configuration satellitale ont tous un effet qui peut permettre de diviser par deux l'écart entre position mesurée par le GPS et position réelle.

STUDY OF GPS ACCURACY IN FOREST ENVIRONMENTS (Abstract)

Although GPS is a comparatively recent technology, many forest mapping applications have been devised but their complete potential and limitations are not yet fully appreciated. The main aim of this work is to assess the usefulness of GPS in open environment and in various forest stands both in winter and summer using several Trimble and Garmin brand receivers. The effect of different parameter settings for the devices (number of data acquisitions to determine a position, data collection intervals, change in satellite constellation) on the quality of measurements is studied.

The series of measurements studied show up a very strong hardware and canopy effect, which entails a variation in average position accuracy of 0.8 to 11 metres. The number of records required to position a site, the data collection interval, differential correction of the data and satellite constellation all have an effect – the discrepancy between the GPS-determined position and the actual position could be halved.